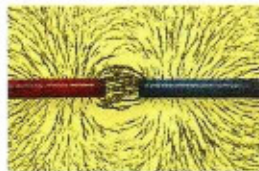




Les milieux magnétiques

QUAND LA MATIÈRE S'AIMANTE



Magnétisme et magnétique sont deux termes relativement usités dans la vie courante, mais souvent dans un sens que les scientifiques qualifieraient d'« ésotérique ». Notre propos ici sera de décrire ce qu'un physicien entend par « magnétisme ». Si l'on voulait résumer en une phrase le thème de cet article, cela pourrait se faire à travers cette question tout à fait anodine : pourquoi une pièce de 5 centimes se colle-t-elle à un aimant, mais pas une pièce de 20 centimes ? Il s'agira donc ici de s'intéresser à ce qu'est un aimant, comment la matière s'aimante, ce que l'on fait avec des aimants, etc.

UN PEU DE VOCABULAIRE

Afin d'exposer le sujet du magnétisme et des milieux aimantés, il est indispensable de clarifier le sens de certains termes.

CHAMP MAGNÉTIQUE

Lorsque l'on place un aimant au voisinage d'un clou en fer, ce dernier va se coller à l'aimant. Pour modéliser cette action « à distance », on introduit au XIX^e siècle la notion de « champ ». Un « champ magnétique » est une grandeur, une chose qui accompagne tout aimant ; ce dernier est donc entouré de son champ magnétique dans lequel il baigne. Nos sens ne nous permettent pas de percevoir ce champ. Du fer placé dans le champ magnétique sera forcé par ce dernier à se précipiter vers les régions où le champ est intense, c'est-à-dire à la surface de l'aimant. Ainsi, grâce au « champ magnétique » dans lequel



on plonge le morceau de fer, on évite une action exercée par l'aimant à distance, et on la remplace par une autre exercée localement par le champ. C'est ce dernier qui rapproche le fer et l'aimant. En 1820, le physicien Danois **Ørsted** (1777-1851) montre qu'un « champ magnétique » accompagne non seulement tout

aimant mais également tout courant électrique. Naît ainsi la science de l'électromagnétisme...

AIMANTS

Les aimants que nous employons de nos jours sont tous artificiels : ils ont été fabriqués en usine. Il existe cependant des aimants naturels à base de magnétite (Fe₃O₄). Certaines pierres sont en effet naturellement aimantées. Ces « pierres d'aimant » étaient



connues dans l'Antiquité, notamment par les Chinois. Certains de ces aimants naturels sont produits par le métabolisme de certaines espèces de bactéries.

PÔLES

Pour des raisons historiques que nous ne détaillerons pas, au XIX^e siècle, un certain Pierre de Maricourt désigne par « pôle nord » et « pôle sud » les deux parties d'un aimant qui attirent le fer particulièrement fort. Il montre également que deux pôles de même nom se repoussent et deux pôles de noms opposés s'attirent.

ÉTYMOLOGIE DU MOT « MAGNÉTISME »

L'étymologie de « magnétisme » n'est pas connue avec certitude : deux récits très différents retracent la racine de ce mot. L'un est dû à Lucrèce (98-55 av. J.-C.), l'autre à Plinius (23-79). Selon Lucrèce, le mot tire son origine d'une ville en Lydie sur la mer Égée où l'on trouvait des aimants naturels : la Magnésie. Cela expliquerait pourquoi le poète grec Sophocle (496-406 av. J.-C.) désigne l'aimant par « pierre de Lydie ». Plinius, lui, se réfère au poète grec Nicander selon lequel un certain berger, appelé Magnès, aurait, le premier, découvert l'aimant naturel en remarquant un jour que la pointe de son bâton ainsi que les clous en fer de ses sandales se collaient à cette pierre.

« magnétiquement durs ». Jusqu'à la Première Guerre mondiale, les meilleurs aimants étaient des aimants constitués d'acier au tungstène. Mais en raison d'une pénurie de tungstène pendant la guerre, on commence à remplacer ce métal par du chrome.

SURVOL HISTORIQUE DES AIMANTS

AVANT LE XVIII^e SIÈCLE

Pendant longtemps, les pierres d'aimant ont été les seuls aimants disponibles. On les employait notamment pour aimanter des

aiguilles en acier pour en faire des boussoles. Notons toutefois que l'on pourrait considérer une telle aiguille comme un aimant artificiel...

Au XIX^e siècle, on a l'idée de prendre en sandwich un aimant naturel taillé en forme de cube entre deux blocs de fer : le fer s'aimante dans le champ magnétique de l'aimant naturel et vient donc ajouter son propre champ à celui de la pierre, ce qui a pour effet d'augmenter le champ magnétique. Ainsi, la combinaison du fer et d'un aimant naturel permet d'obtenir les premiers aimants artificiels. Vers 1600, on découvre que contrairement au fer qui perd son aimantation lorsqu'il est éloigné d'un aimant naturel, l'acier conserve son aimantation : c'est ce que l'on appelle la « rémanence ».

XIX^e SIÈCLE

En 1781, on montre que l'acier est constitué de près de 99 % de fer et de 1 % de carbone. Puis, lorsqu'en 1820, on découvre le champ magnétique accompagnant tout courant électrique, on commence à employer ce champ pour aimanter l'acier et fabriquer les aimants artificiels. Concrètement, il suffit de faire parcourir pendant quelques instants un courant électrique dans un fil enroulé autour d'un barreau en acier pour aimanter ce dernier de manière permanente. Jusqu'à la fin du XIX^e siècle, on emploie l'acier.

XX^e SIÈCLE

En 1897, **Marie Curie** (1867-1934) découvre que l'ajout de chrome ou



de tungstène ou encore de molybdène à l'acier améliore la rémanence. Ces alliages se désaimantent en effet plus difficilement : ils sont dit

« magnétiquement durs ». Jusqu'à la Première Guerre mondiale, les meilleurs aimants étaient des aimants constitués d'acier au tungstène. Mais en raison d'une pénurie de tungstène pendant la guerre, on commence à remplacer ce métal par du chrome.

ANNÉES 1920

En 1920, le Japonais Honda découvre que l'addition de 35 % de cobalt à l'acier chromé améliore encore la dureté magnétique. Cette amélioration de la dureté est très recherchée, car les aimants ont toujours tendance à se désaimanter. La diversité et la qualité des aimants augmentant, les industriels ont été

amenés à introduire deux notions pour évaluer la qualité d'un aimant. La première se rapporte au champ magnétique que l'aimant développe : plus ce champ est intense, plus fort est l'aimant. Cela se mesure en *oersted*. La deuxième se rapporte à la dureté magnétique et se mesure en gauss. Souvent, on mesure la qualité d'un aimant par le produit de ces deux grandeurs en gauss.oersted ou Goe. Les meilleurs aimants des années 1920 atteignaient 1 000 000 Goe ou 1 mégagoe = 1 MGOe.

UNITÉS MAGNÉTIQUES

1 gauss = 1 oersted
1 tesla = 10 000 gauss = 10 000 oersted

ANNÉES 1930

Au cours des années 1930, l'acier est détrôné par un nouveau type d'aimant appelé ALNICO mis au point par les Japonais. Les aimants ALNICO sont constitués d'aluminium, de nickel, de cobalt... mais surtout de 50 % de fer et affichent 8 MGOe. Cette amélioration des performances entraîne une réduction de la taille. Une des premières applications de ce début de miniaturisation trouve sa place dans les écouteurs et micros des téléphones... Ces derniers étaient très gros, en deux parties, car les aimants qu'ils contenaient étaient gros. Avec la miniaturisation,



l'écouteur et le micro se combinent en un seul ensemble : le « combiné ».

UN AIMANT SE DÉSAIMANTE NATURELLEMENT

En effet, on peut par la pensée considérer qu'un aimant rectangulaire par exemple est constitué de deux aimants juxtaposés côte à côte et collés, les deux Nord ensemble, les deux Sud ensemble. Or, deux Nord se repoussent... idem pour deux Sud. Par conséquent, ce système a naturellement tendance à former deux moitiés orientées en sens opposés, ce qui a pour effet de provoquer la désaimantation de l'ensemble. Pendant longtemps, le seul moyen pour maintenir deux Nord côte à côte et deux Sud côte à côte, évitant ainsi la perte d'aimantation, consistait à présenter l'extrémité Nord de l'aimant près de son extrémité

ANNÉES 1950

Dans les années 1950, les aimants « ferrites » sont mis au point. Il s'agit d'oxydes ; souvent de fer-baryum ou de fer-strontium. Les aimants ferrites sont plus durs que les ALNICO, mais sont moins « forts » que ces derniers ; au total, en « dureté-force » ils sont moins performants que les ALNICO. Pourtant, aujourd'hui encore ils occupent 90 % en poids du marché des aimants. Pourquoi ? Parce qu'ils sont très bon marché. La mise au point de la bombe nucléaire durant la Seconde Guerre mondiale et les études en physique nucléaire qui s'ensuivent mettent à la disposition des physiciens de grandes quantités d'éléments que l'on désigne par « terres rares » et que l'on trouve en abondance dans les produits de fission de l'uranium. La famille des terres rares regroupe l'yttrium, le scandium et les éléments du tableau périodique que l'on désigne sous le nom de lanthanides.

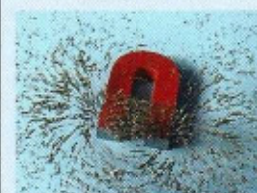
ANNÉES 1970

On découvre au cours des années 1960 que les terres rares constituent des éléments très intéressants du point de vue magnétique. Apparaissent ainsi au début des années 1970 les premiers aimants aux terres rares : les samarium-cobalt SmCo avec 20 000 gauss en dureté et 1 250 oersted en champ à la surface de l'aimant, soit au total 25 MGOe.

ANNÉES 1980

À la fin des années 1970, des troubles politiques au Zaïre, principale source de cobalt au monde, conduisent les fabricants d'aimants à trouver un substitut aux aimants Sm-Co. C'est ainsi qu'en 1985 apparaissent les aimants au néodyme-fer-bore, couramment appelés « aimants néodyme » ou

Sud : il fallait donc plier l'aimant en forme de U. Le Sud attirant le Nord, cette force magnétique que chaque pôle exerçait sur l'autre empêchait la désaimantation. Aujourd'hui, il n'est plus nécessaire de recourir à une telle astuce, ce qui explique pourquoi on ne trouve plus d'aimant en U, même si ce dernier



constitue le symbole par excellence des aimants.

Attraction et répulsion

10⁸ tesla
Champ magnétique d'une étoile à neutrons.

1,3 tesla
Champ magnétique d'un Néodyme.

1 100 °C
Température de Curie du cobalt.

770 °C
Température de Curie du fer.

360 °C
Température de Curie du nickel.

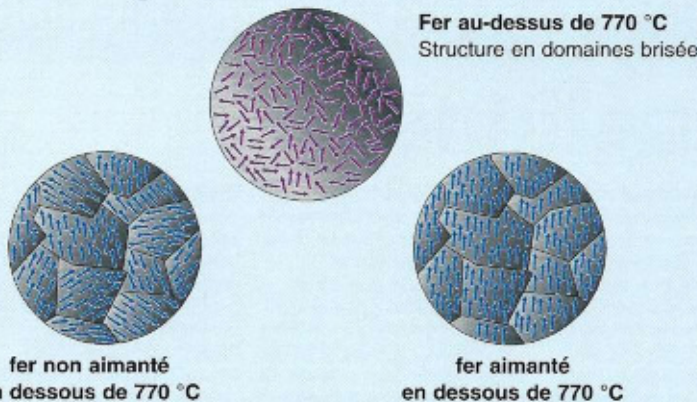
XIX^e siècle
Les termes « pôle nord » et « pôle sud » ont été introduits au XIX^e siècle par Paul de Maricourt.

Vers 1600
Découverte du phénomène de rémanence : l'acier conserve son aimantation, même une fois éloigné d'un aimant naturel.

Les pierres d'aimant



Ferromagnétisme et température de Curie du fer



« néo ». Ces aimants affichent 50 MGOe, dont 10 000 gauss en dureté, contre 100 gauss seulement pour l'acier.

LA MATIÈRE DANS UN CHAMP MAGNÉTIQUE

Fait assez méconnu : toute matière, qu'il s'agisse de l'eau, du bois, du fer, de l'aluminium, de l'oxygène... absolument toute substance placée dans un champ magnétique s'aimante. Il s'agit là d'une propriété générale de la matière : elle s'aimante lorsqu'elle se trouve dans un champ magnétique ; autrement dit, sous l'influence du champ magnétisant, elle devient elle-même aimant et développe son propre champ magnétique. Cependant, cette aimantation s'effectue de manière très différente en fonction des substances et cela conduit à des comportements très différents : alors que le fer vient se coller à un aimant, on ne constate rien de tel avec le bois. En effet, l'aimantation peut prendre essentiellement trois allures en fonction de son sens et son intensité : forte et dans le même sens que le champ magnétisant, faible et dans le même sens que le champ magnétisant, très faible et en sens opposé au champ magnétisant. Alors que dans les deux premiers cas – appelés respectivement ferromagnétisme et paramagnétisme – on observe une attraction, dans le dernier – appelé diamagnétisme – on observe une répulsion. Nous allons

MOMENT MAGNÉTIQUE

Dans la représentation d'un dipôle magnétique, on imagine deux pôles magnétiques nord et sud de même intensité m , séparés d'une certaine distance d . Dans ce modèle, le moment magnétique porte le nom de moment magnétique dipolaire m_d ; $m_d = m \cdot d$ et l'unité employée pour la décrire est le weber.mètre. Dans le modèle du courant ampérien, on imagine une boucle de courant. Ce courant pourrait être considéré comme la résultante des mouvements des électrons autour du noyau. On parle alors de moment magnétique ampérien m_A ; il est défini par le produit de l'intensité i du courant par l'aire A que délimite le courant circulaire : $m_A = i \cdot A$ et son unité est l'ampère multiplié par le mètre carré $A.m^2$.

commencer par décrire ce dernier cas, car il s'agit d'un caractère général de la matière auquel se superpose parfois un effet paramagnétique ou ferromagnétique qui vient masquer l'effet répulsif du diamagnétisme.

UN EFFET RÉPULSIF UNIVERSEL : LE DIAMAGNÉTISME

Grâce à la physique quantique, il est possible de montrer que la matière soumise à un champ magnétique exhibe un comportement que l'on peut généraliser à toute substance : les atomes ont tendance à fuir les régions où le champ est fort pour aller se réfugier vers les régions où le champ est faible. C'est le diamagnétisme. L'explication de ce phénomène réside dans l'échelle subatomique et repose sur le comportement des électrons du nuage électronique autour du noyau atomique. A priori, on devrait donc toujours observer une répulsion. Or, non seulement on ne voit aucune répulsion lorsque l'on approche un aimant de la plupart des substances qui nous entourent, mais parfois on observe même le contraire : le fer subit une attraction. Comment expliquer cela ?

LE DIAMAGNÉTISME MASQUÉ

Certains atomes et molécules peuvent être assimilés à de microscopiques aimants : on dit qu'ils possèdent un moment magnétique. Il y a deux manières de se représenter le moment magnétique, mais aucune ne correspond à une « réalité » : il s'agit seulement d'une représentation théorique commode pour l'esprit. On parle de dipôle magnétique ou de courant ampérien. Lorsque les atomes possèdent un moment magnétique, l'effet diamagnétique répulsif est contrecarré et masqué par un effet attractif qui peut être dû au paramagnétisme ou au ferromagnétisme. Par conséquent, la répulsion due au diamagnétisme n'est visible que lorsque le moment dipolaire est nul. Dans ce cas et seulement dans ce cas, la matière présente une aimantation en sens opposé au champ magnétisant : il y a répulsion. Bien que des substances de ce type soient très répandues (eau, bois, plastiques, cuivre, mercure, silicium, zinc...) il s'agit d'un effet toujours extrêmement faible qui nécessite un champ magnétisant très fort. Les aimants ordinaires n'étant pas suffisamment

fort, on ne se rend jamais compte que le bois, l'eau ou le graphite fuient un aimant. Mais cela est facilement visible dès que l'on emploie des aimants puissants au néodyme.

LE PARAMAGNÉTISME ET LE FERROMAGNÉTISME

Parmi les éléments qui possèdent un moment magnétique, nous allons prendre les exemples de l'aluminium et du fer. Ces deux éléments ne réagissent pas du tout de la même manière à l'approche d'un aimant. Cela tient au fait que les atomes d'aluminium agissent individuellement, indépendamment les uns des autres, alors que ceux de fer se regroupent et renforcent l'effet.

L'aluminium est paramagnétique

Lorsque l'on approche un aimant de l'aluminium, tout se passe comme si on l'approchait d'autant de minuscules aimants qu'il y a d'atomes d'aluminium. Le moment magnétique de chacun de ces atomes d'aluminium est très faible, mais chacun tend à orienter son moment dans le même sens que le champ de l'aimant vers lequel il est alors attiré. Cependant, en raison de l'agitation thermique qui oriente les moments en tous sens, la fraction des atomes convenablement orientés dans la population de l'échantillon d'aluminium n'est pas très élevée : beaucoup sont orientés en sens opposé. Aussi, on observe une attraction, mais faible. Pour l'observer, il faut employer un aimant puissant au néodyme. Cela se comprend, l'intensité du paramagnétisme diminue lorsque la température grimpe. Aussi, à très basse température, le paramagnétisme devient souvent bien visible, comme c'est le cas notamment avec la molécule d'oxygène à -185 °C (O_2 liquide). Parmi les autres éléments paramagnétiques citons le sodium, le platine, le manganèse...

Le fer est ferromagnétique

L'atome de fer comme celui d'aluminium possède un moment magnétique. Cependant, pour des raisons qui relèvent de la mécanique quantique, apparaît entre les atomes de fer une interaction, appelée interaction d'échange, qui tend à aligner spontanément le moment magnétique d'un atome avec ceux de ses voisins jusqu'à une distance relativement grande puisque cela met en jeu des

milliards d'atomes : on obtient ainsi un domaine magnétique appelé aussi domaine de Weiss – du nom du physicien français Pierre Weiss (1865-1940). Les corps qui présentent une structure magnétique en domaines sont appelés ferromagnétiques. Le fer et l'acier en sont deux exemples. Dans un échantillon de fer non aimanté, aussi petit qu'un grain d'une poudre de fer, il existe des milliards de domaines magnétiques orientés aléatoirement. Cette disposition aléatoire des domaines magnétiques conduit à un bilan global nul : les domaines annulent leurs effets et l'échantillon de fer est non aimanté bien qu'il soit constitué de milliards de domaines aimantés. Lorsque l'on place un tel échantillon dans un champ magnétique externe, ce dernier contraint tous les domaines à s'orienter dans le même sens : celui imposé par le champ externe. Le fer s'aimante ainsi dans le même sens que le champ magnétisant, ce qui provoque une forte attraction. Contrairement aux pièces de 10, 20 et 50 centimes, les pièces de 1, 2 et 5 centimes contiennent de l'acier...

Il faut noter que dans un échantillon non aimanté il n'y a pas que des domaines : entre deux domaines magnétiques adjacents orientés en deux sens différents, il existe une frontière plus ou moins épaisse constituée d'atomes de fer dont le moment magnétique passe progressivement de l'orientation d'un des domaines vers celle de l'autre.



Cette frontière constitue une paroi appelée paroi de Bloch du nom du physicien suisse Félix Bloch (1905-1983). Les parois jouent un rôle déterminant

dans la facilité avec laquelle un échantillon s'aimante ou se désaimante. Dans le fer pur cela se fait très facilement : c'est la raison pour laquelle le fer pur ne conserve pas son aimantation et se désaimante dès que le champ magnétisant est retiré. En revanche, dans l'acier, les atomes de carbone bloquent en quelque sorte le mouvement des moments magnétiques dans les parois et empêchent le changement de l'ordre magnétique.

La transition ferro-para



Au-dessus d'une certaine température, appelée température de Curie du nom du physicien français Pierre Curie (1859-1906),

la structure en domaines est brisée par l'agitation thermique (mais les atomes conservent leur moment magnétique). La substance ferromagnétique devient donc paramagnétique au-dessus de sa température de Curie. A température ambiante, le fer, le nickel et le cobalt sont les seuls éléments ferromagnétiques du tableau

périodique, c'est-à-dire possédant des domaines. Signalons que les pièces de 1 et 2 euros contiennent du nickel. La température de Curie du fer est d'environ 770 °C , celle du cobalt et du nickel valent respectivement 1100 °C et 360 °C . Le gadolinium possède une température de Curie de 19 °C : dans le creux de la main, il ne se colle pas à un aimant ordinaire, dans le réfrigérateur il s'y colle.

AUTRES FORMES DE MAGNÉTISME

Il existe d'autres formes de magnétisme que l'on pourrait qualifier de « variantes » du ferromagnétisme. Afin d'illustrer ce point, citons le ferrimagnétisme et l'antiferromagnétisme. Dans ces deux cas, il n'existe que deux sortes de domaines orientés en sens opposés. Dans l'antiferromagnétisme, les deux intensités d'aimantation de ces deux groupes de domaines sont égales et en sens opposés, si bien qu'il y a annulation des champs. Dans le ferrimagnétisme, les intensités sont inégales et on observe un champ global non nul.

LES SUPRACONDUCTEURS

Les supraconducteurs sont connus du grand public comme des matériaux dont la résistance électrique est nulle. Cependant, il ne s'agit pas là de la seule propriété remarquable des supraconducteurs. Ces derniers sont également des diamagnétiques parfaits. Qu'entend-on au juste par là ? Dans la mesure où un diamagnétique s'oppose au champ externe, la valeur du champ au sein d'un diamagnétique – comme par exemple le graphite – est toujours inférieure à sa valeur à l'extérieur du corps (c'est le contraire avec un paramagnétique ou un ferromagnétique). Cette valeur est plus faible mais jamais nulle. Dans un supraconducteur, elle est nulle. Ce qui explique pourquoi on parle de diamagnétisme parfait.

APPLICATIONS DES AIMANTS

L'étude et la mise au point des matériaux magnétiques revêt une importance capitale dans l'économie et nos sociétés modernes, que l'on songe, aux disques durs qui stockent l'information sur des supports magnétiques, aux aimants employés dans les alternateurs des centrales pour la production de l'électricité, à ceux employés dans les moteurs électriques, les hauts parleurs, l'imagerie par résonance magnétique **IRM**, aux



matériaux magnétiques employés dans les transformateurs électriques... Dans un domaine plus théorique, citons l'exemple des accélérateurs de particules qui courbent la trajectoire des particules chargées grâce à de puissants aimants.